

**REVISITANDO LA IRRUPCIÓN DE AIRE FRÍO EXTREMA DE JUNIO DE 1967
EN EL CENTRO DE ARGENTINA, CINCUENTA AÑOS DESPUÉS**Ramiro I. Saurral^{1,2} y Juan J. Ruiz^{1,2}¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA.²Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-UBA) y UMI-IFAECI/CNRS.

(Manuscrito recibido el 7 de enero de 2018, en su versión final el 29 de mayo de 2018)

RESUMEN

Durante el mes de junio de 1967 aire frío de origen polar avanzó desde el continente antártico hacia el centro de Argentina, donde dejó temperaturas mínimas extremas, nevadas y cuantiosos daños a los cultivos. Cincuenta años después, este trabajo revisita dicha situación sinóptica haciendo uso de datos de reanálisis y modelado numérico con el fin de caracterizar los procesos físicos involucrados. En términos estadísticos, esta irrupción fría fue la más intensa de los últimos 50 años en una amplia región del centro argentino no solamente en superficie sino también en niveles bajos y medios de la troposfera. El ingreso del aire frío se asoció al avance de un intenso frente frío detrás del cual una masa de aire de origen polar se trasladó desde latitudes subpolares hacia el centro y norte de la Argentina. Si bien dicha masa de aire sufrió una profunda transformación durante su desplazamiento por zonas oceánicas, tal como se muestra mediante las simulaciones numéricas, la advección térmica en primer término y el enfriamiento radiativo más tarde actuaron de modo de contribuir a las temperaturas mínimas extremas.

Palabras clave: Irrupciones de aire frío, meteorología sinóptica, temperaturas extremas.

**REVISITING THE EXTREME COLD AIR OUTBREAK OF JUNE 1967 OVER
CENTRAL ARGENTINA, FIFTY YEARS LATER****ABSTRACT**

During the month of June 1967 cold polar air moved from the Antarctic continent into central Argentina, where it brought extremely low minimum temperatures, snow and extensive damage to crops. Fifty years later, this paper revisits such synoptic situation making use of reanalysis data as well as numerical modelling in order to characterize the physical mechanisms at play. In a statistical context, this cold air outbreak was the most intense in the last 50 years in an extensive area covering central Argentina, not only at the surface but also at low and middle levels of the troposphere. The cold air outbreak was associated with the displacement of a cold front, behind which a polar air mass moved from subpolar latitudes onto central and northern Argentina. Although the air mass suffered a noticeable modification while traversing oceanic areas, as seen by the numerical simulations, temperature advection first and radiative cooling afterwards contributed to the extreme minimum

temperatures.

Keywords: Cold air outbreaks, synoptic meteorology, extreme temperatures.

1. INTRODUCCIÓN

Las irrupciones de aire frío (IAF) son un rasgo distintivo de la variabilidad sinóptica de latitudes medias en general y de Sudamérica en particular. Durante la época fría, estos ingresos de origen polar se asocian con intensos sistemas de alta presión (Walsh y otros, 2001) y suelen provocar impactos negativos en distintas actividades tales como la agricultura (Müller y Berri, 2007), el transporte (Degelia y otros, 2016) y la salud (Roussel y otros, 2016).

Diversos autores han caracterizado la variabilidad de las IAF sobre Sudamérica donde, si bien son más frecuentes e intensas durante el invierno, se dan a lo largo de todo el año (Garreaud, 1999). Lichtenstein (1989) analizó el rol de la cordillera de los Andes en la canalización del aire frío al este de la topografía. Rusticucci y Vargas (1995) identificaron los tres modos principales de circulación asociados a bajas temperaturas en el invierno, en tanto que Garreaud (1999) empleó un modelo numérico para simular el ingreso de aire frío en regiones tropicales y subtropicales de Sudamérica. Escobar y Bischoff (1999) identificaron los patrones principales de la circulación atmosférica en niveles bajos asociados a IAF sobre el centro de Argentina que determinan un incremento en el consumo de energía en Buenos Aires. Vera y Vigliarolo (2000) emplearon un análisis de Funciones Ortogonales Empíricas para mostrar la evolución de los campos de altura geopotencial de 300 y 850 hPa antes, durante y después del ingreso de aire frío en el sur de Sudamérica, considerando además aquellas IAF que ocasionan heladas en el sur de Brasil. Más recientemente, Salio y otros (2006) realizaron una climatología sinóptica de las IAF que ocasionan nevadas en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, en tanto que Saucedo y otros (2009) caracterizaron la circulación atmosférica que afectó al sur de Sudamérica durante el

invierno de 2007, uno de los más fríos de las últimas décadas en Argentina. En todos los casos, se encontró que las IAF son precedidas por el avance de un frente frío proveniente de latitudes altas que transporta aire frío hacia latitudes subtropicales (Escobar y Bischoff, 1999), pudiendo en ocasiones alcanzar el sur de Brasil (Müller y Berri, 2007).

Cincuenta años atrás, entre los días 10 y 15 de junio de 1967, una intensa y persistente IAF afectó a gran parte de la Argentina. Este ingreso de aire de origen polar llevó en numerosas localidades a que las temperaturas mínimas alcanzaran nuevos valores mínimos históricos y afectó severamente a varias especies de cultivos en el centro argentino. Scian (1970) documentó la configuración sinóptica asociada a dicha IAF así como también la evolución del perfil vertical de temperatura sobre el centro de Argentina antes, durante y después del ingreso del aire polar. En el marco del quincuagésimo aniversario de dicho evento, el presente trabajo tiene como objetivo principal el de revisar dicha situación sinóptica, en este caso empleando datos de reanálisis que no estaban disponibles al momento del trabajo de Scian (1970), así como también contextualizando la IAF dentro de los ingresos de aire polar de las últimas décadas, sus trayectorias preferenciales y estructuras verticales. Asimismo, se pretende caracterizar y comprender mejor los procesos físicos asociados al ingreso de la masa de aire frío mediante la utilización de un modelo atmosférico regional. El presente estudio puede resultar útil como modelo conceptual de los ingresos de aire polar sobre latitudes subtropicales del continente sudamericano así como también para avanzar en la comprensión y caracterización de los mecanismos involucrados en dichas situaciones sinópticas.

El trabajo se estructura de la siguiente manera: la Sección 2 incluye los datos y metodologías utilizados en el trabajo. La Sección 3 presenta

un análisis de la IAF desde un punto de vista estadístico, considerando los extremos de temperatura alcanzados, su ubicación dentro de las IAF más intensas de las últimas décadas y sus trayectorias preferenciales antes de alcanzar el continente. También incluye la caracterización de las estructuras verticales de dichas IAF extremas y analiza en particular la situación sinóptica asociada al ingreso de aire polar de junio de 1967. La Sección 4 incluye los resultados de las simulaciones numéricas con el modelo regional. Finalmente, la Sección 5 incluye una discusión de los resultados principales y las conclusiones.

2. DATOS Y METODOLOGÍAS

2.1 Observaciones

Se emplearon datos diarios de temperatura mínima (TMn) de 61 estaciones sinópticas argentinas durante el período 1961-2010 (50 años; ver listado de estaciones en la Tabla 1), así como también datos de tiempo significativo de las mismas estaciones entre los días 10 y 15 de junio de 1967 provenientes de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la Universidad de Buenos Aires (DCAO, FCEN-UBA). Se requirió que las estaciones tuviesen menos de un 5 % de datos faltantes de TMn a lo largo del período 1961-2010 para ser consideradas en el análisis. Se dispuso también de información diaria de perfiles verticales de temperatura de todas las estaciones aerológicas argentinas para el mismo período, obtenida de la base de datos Integrated Global Radiosonde Archive versión 2 (IGRA2; Durre y otros, 2016). Estos datos permitieron caracterizar el perfil termodinámico sobre la vertical de Ezeiza (donde se registraron valores de TMn extremos para la localidad) así como también de aquellas IAF más intensas de los últimos 50 años.

2.2 Reanálisis

En este trabajo se emplearon dos conjuntos de reanálisis: uno conteniendo datos de temperatura de la superficie del mar (TSM) obtenidos de la

base de datos del Hadley Center versión 1.1, HadISSTv1.1 (Rayner y otros, 2003) para el mes de junio de 1967, y el otro incluyendo un conjunto de variables atmosféricas de reanálisis NCEP/NCAR I (Kalnay y otros, 1996) del cual se obtuvo información de altura geopotencial (H), temperatura (T) y viento (V) en 17 niveles de presión, y de presión al nivel medio del mar (PNMM) entre los días 10 y 15 de junio de 1967 con una resolución horizontal de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Asimismo, y con el fin de determinar las trayectorias de las más intensas masas de aire frío que ingresaron en el centro de Argentina durante el período 1961-2010, se empleó el modelo HYSPLIT (Stein y otros, 2015) en forma online (<http://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>). Este modelo calcula trayectorias tri-dimensionales en base al campo de movimiento provisto por el conjunto de reanálisis NCEP/NCAR I. Asimismo, en base a la información de reanálisis se construyeron mapas mostrando la evolución de la situación sinóptica antes, durante y después del ingreso del aire polar sobre el centro de Argentina.

2.3 Modelo regional WRF

Con el objetivo de analizar más en detalle los procesos dinámicos y termodinámicos que dieron lugar a las temperaturas extremas en la región centro de Argentina durante el caso de estudio, se realizó una simulación con el modelo regional WRF-ARW versión V3.7 (Skamarock y otros, 2005). El dominio abarcado por la simulación se muestra en la Fig. 1. La resolución horizontal utilizada es de 50 km con 60 niveles verticales, de los cuales los primeros 7 se ubican en los 100 hPa más próximos a la superficie. Los procesos convectivos son parametrizados utilizando el esquema de Kain-Fritsch (Kain, 2004), la capa límite planetaria utilizando el esquema de Yonsei University (Hong y Pan, 1996) y la radiación utilizando los esquemas de Dhudia (Dhudia, 1989) y RRTM (Mlawer y otros, 1997). Las condiciones iniciales y de borde fueron generadas a partir de los reanálisis NCEP/NCAR I con una resolución horizontal de 2.5 grados y temporal de 6 horas.

Estación	TMn jun	TMn jun 67	TMn abs jun 67
Aeroparque	8.8	4.7	-4.8
Azul	2.5	-1.2	-10.1
Bahía Blanca	3.3	-0.1	-8.5
Bariloche	-0.8	-4.0	-15.7
Bolívar	3.7	-0.7	-8.5
Catamarca	5.5	2.1	-5.3
Cnel Suárez	1.7	-2.3	-10.1
Concordia	8.2	6.0	-5.0
Córdoba	4.9	0.1	-8.0
Corrientes	11.3	7.8	-2.0
Dolores	4.1	0.6	-9.6
Esquel	-2.1	-5.4	-17.3
Ezeiza	5.6	2.0	-7.8
Formosa	12.6	9.3	1.3
General Pico	3.4	-1.9	-11.0
Galeguaychú	6.5	3.5	-7.0
Oberá	11.1	9.0	-0.8
Jujuy	6.7	4.6	-2.2
Junín	4.5	0.3	-9.2
La Plata	5.8	2.4	-5.7
La Rioja	5.3	1.0	-5.6
Malargüe	-1.4	-4.5	-12.9
Maquinchao	-3.0	-7.5	-18.6
M Juárez	5.0	0.9	-10.0
Mar del Plata	4.0	1.5	-5.6
Mendoza	2.4	-2.1	-7.2
M Caseros	9.4	6.8	-2.5
Neuquén	1.1	-2.4	-10.8
9 de julio	4.7	0.5	-7.2
OCBA	7.9	3.7	-5.3
El Palomar	5.8	2.7	-8.0

Estación	TMn jun	TMn jun 67	TMn abs jun 67
Paraná	7.6	3.8	-5.1
P d l Libres	9.4	7.0	-3.0
Pehuajó	3.8	-1.6	-9.6
Pigüé	2.1	-2.3	-10.5
Pilar Obs	5.3	-0.4	-9.0
Posadas	11.9	8.8	-1.5
Reconquista	9.6	6.2	-2.0
Resistencia	10.7	6.8	-2.0
Río Cuarto	4.9	0.7	-7.6
R Gallegos	-2.1	-1.2	-7.6
Río Grande	-3.2	-3.2	-10.2
Rosario	5.7	1.3	-8.1
Salta	4.0	0.9	-6.1
San Juan	1.3	-3.6	-9.2
San Julián	-0.3	-0.7	-7.6
San Luis	4.3	-0.5	-7.8
Santa Rosa	2.7	-2.8	-12.7
S del Estero	6.7	2.1	-3.4
Sauce Viejo	7.5	3.1	-7.0
Tandil	2.6	-0.3	-11.0
Tartagal	10.5	7.5	1.4
T Lauquen	4.3	-0.8	-8.8
Trelew	1.0	-2.3	-9.8
3 Arroyos	3.7	0.1	-7.6
Tucumán	8.1	3.6	-1.1
Ushuaia	-1.3	-0.5	-6.7
V Reynolds	1.0	-3.8	-12.0
Victorica	2.2	-2.5	-12.6
Viedma	2.2	-0.1	-5.7
V Maria	5.0	0.7	-8.0

Tabla 1: Temperatura mínima media mensual para el mes de junio (período 1961-2010), temperatura mínima media registrada en junio de 1967 y temperatura mínima diaria absoluta durante el mes de junio de 1967 en diversas localidades de Argentina. Los números en *itálica* **negrita** en la cuarta columna indican que el valor de temperatura mínima diaria absoluta registrada en junio de 1967 es la mínima más baja entre todos los meses de junio de la serie (período 1961-2010).

La simulación se inició a las 00 UTC del día 10 de junio de 1967 y se extendió por un plazo de 7 días. En simulaciones que se extienden durante un plazo de varios días y con un dominio relativamente grande como el que se utiliza en este trabajo, la simulación realizada con el dominio regional puede diferir significativamente respecto del valor de las variables en los bordes del dominio. Por este motivo, y para garantizar que la circulación de gran escala dentro del dominio regional fuera consistente con los reanálisis, se utilizó la técnica de relajación newtoniana espectral (Waldron y otros, 1996). Dicha técnica permite introducir

términos de forzado selectivo que se aplica solo en determinadas escalas espaciales y en determinados niveles verticales. En este caso el forzado se aplicó para longitudes de onda de 3000 km o mayores en las variables viento horizontal, geopotencial, temperatura y humedad específica con un tiempo de relajación de 5000 segundos que es aproximadamente la mitad del valor por defecto en WRF (Gisan y otros, 2013). La incorporación del forzado permitió alcanzar un mayor grado de coherencia entre la evolución de los sistemas de escala sinóptica en el reanálisis y en la simulación realizada con el modelo WRF (no se muestra). Por otra parte y dado que uno

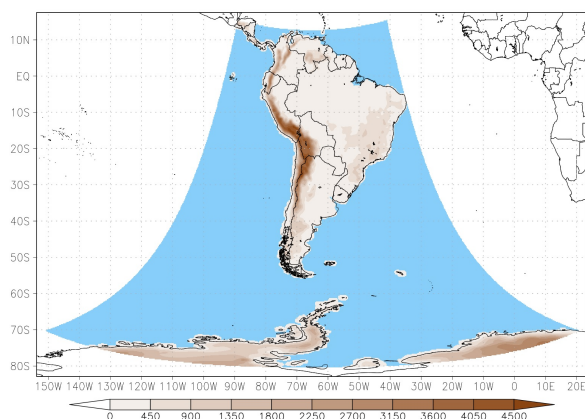


Figura 1: Ubicación del dominio utilizado en la simulación realizada con el modelo WRF y topografía (en metros).

de los focos de este trabajo es el análisis de los procesos dinámicos y termodinámicos que condujeron a las temperaturas extremas, no se aplicó el forzado espectral en los niveles del modelo ubicados por debajo de los 3000 metros de altura por encima del nivel del mar. A partir de dicho nivel, la magnitud de los coeficientes de relajación se fue incrementando linealmente hasta alcanzar el valor indicado previamente.

Las salidas del modelo fueron almacenadas con una frecuencia horaria de manera de permitir por un lado un cálculo más preciso de la trayectoria seguida por las parcelas asociadas a las bajas temperaturas cerca de superficie y por otro lado para poder realizar un análisis más exacto de los términos de la ecuación termodinámica.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA SITUACIÓN SINÓPTICA

3.1 Estadística de la irrupción

Las series de TMn de las estaciones de superficie fueron en primer lugar empleadas para obtener los valores medios correspondientes al mes de junio (período 1961-2010). Dichos valores medios fueron luego contrastados contra el promedio de TMn de junio de 1967. También se identificó el valor más bajo de TMn alcanzado durante la IAF, y en base al cálculo de los percentiles sobre las

distribuciones de TMn se pudo catalogar el valor del percentil correspondiente a la TMn durante la IAF analizada para cada una de las estaciones consideradas.

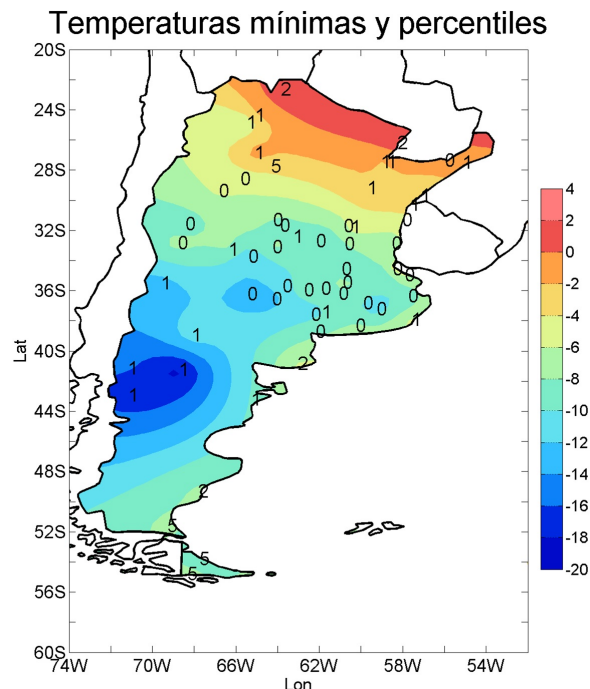


Figura 2: Temperaturas mínimas absolutas (sombreado, en °C) registradas durante la irrupción fría, en base a datos reportados por estaciones del SMN entre los días 10 y 18 de junio de 1967. Los números dentro del mapa indican el percentil correspondiente a la temperatura mínima absoluta de dicha situación, considerando toda la serie de temperaturas mínimas diarias de los meses de junio entre 1961 y 2010 para cada localidad. Los valores asociados al percentil 0 indican que la temperatura mínima alcanzada durante esta irrupción fría se encontró entre las más bajas de toda la serie de temperaturas mínimas del mes de junio.

La IAF de junio de 1967 fue la más intensa de al menos los últimos 50 años en una gran parte de la Argentina. La Fig. 2 muestra la TMn absoluta registrada en las 61 estaciones sinópticas disponibles (en sombreado) junto con el valor

del percentil que le corresponde en función de la distribución de TMn diarias de junio en el período 1961-2010. Durante el irrupción fría se alcanzaron temperaturas extremas menores a -10°C en un amplio sector del centro del país y de la región patagónica. Entre las estaciones consideradas, la temperatura más baja se registró en Maquinchao (Río Negro) y fue de $-18,6^{\circ}\text{C}$. Es de destacar que una importante cantidad de estaciones meteorológicas, sobre todo aquellas ubicadas en el centro de la Argentina, registraron valores de TMn que corresponden al percentil 0 en sus respectivas distribuciones, indicando que se trata de valores mínimos extremos en las series. Usualmente en estadística se emplea el concepto de percentil 0 para referir que un valor representa un mínimo absoluto en una dada distribución (en este caso, en la de TMn de junio). Asimismo, los percentiles 1 y 2 también representan valores extremadamente bajos de las series. La rigurosidad del aire frío se observa incluso en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), donde las estaciones Observatorio Central Buenos Aires (OCBA), Aeroparque y Ezeiza registraron valores mínimos de $-5,3^{\circ}\text{C}$, $-4,8^{\circ}\text{C}$ y $-7,8^{\circ}\text{C}$, respectivamente, siendo en todos los casos los valores más bajos para el mes de junio. Cabe aclarar que en la estación OCBA, dicho valor es el más bajo de junio no sólo en el período 1961-2010 sino considerando todo el registro de la estación que comienza en 1908 y llega hasta la actualidad. Si bien las temperaturas también fueron muy bajas en el extremo norte y sur del país, las mismas no corresponden a marcas mínimas históricas tal como se ve en los valores de los percentiles, variando entre 1 y 2 sobre estaciones de Jujuy, Salta, Formosa y Chaco y llegando incluso hasta el percentil 5 en Río Gallegos, Río Grande y Ushuaia. La excepción es Posadas, donde el valor registrado de $-1,5^{\circ}\text{C}$ corresponde al valor mínimo de la serie en el período 1961-2010. La Tabla 1 muestra, para cada estación, los valores de TMn media del mes de junio, aquellos correspondientes al mes de junio de 1967, y el valor de TMn absoluta registrada durante la IAF analizada, remarcando aquellos que son mínimos históricos de cada serie. Puede apreciarse que la TMn media del mes

de junio de 1967 fue más baja que el promedio histórico en la gran mayoría de las estaciones argentinas, excepto en Río Gallegos, Río Grande y Ushuaia, todas en el extremo sur patagónico, donde la TMn media de ese mes fue igual o algo más alta que el promedio histórico.

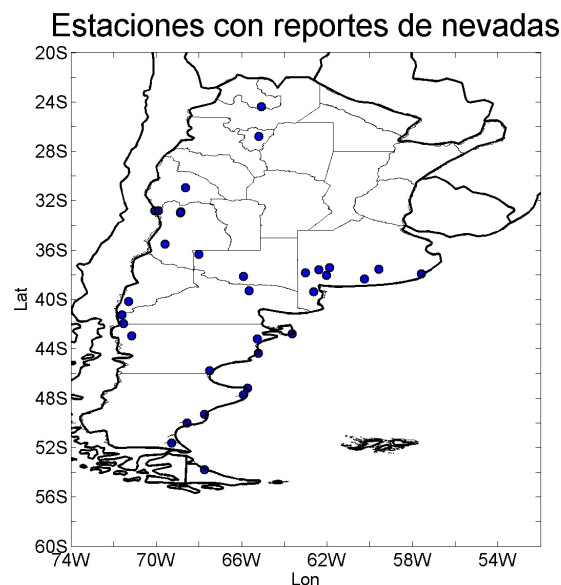


Figura 3: Localidades que reportaron nevada, chaparrón de nieve, aguanieve y/o gránulos de hielo al menos un día entre el 10 y el 18 de junio de 1967, en base a reportes del SMN.

El ingreso de la masa de aire frío durante la primera quincena de junio de 1967 estuvo acompañado por algún tipo de hidrometeoro sólido en varias estaciones patagónicas y del centro de la Argentina. La Fig. 3 muestra las estaciones donde se reportó nevada, chaparrón de nieve, aguanieve y/o gránulos de hielo al menos una vez entre los días 10 y 18 de junio de 1967. En particular, la zona costera patagónica y el sur de la provincia de Buenos Aires se vieron afectados por este tipo de fenómenos, tal como suele ocurrir en IAF intensas sobre la región (Salio y otros, 2006).

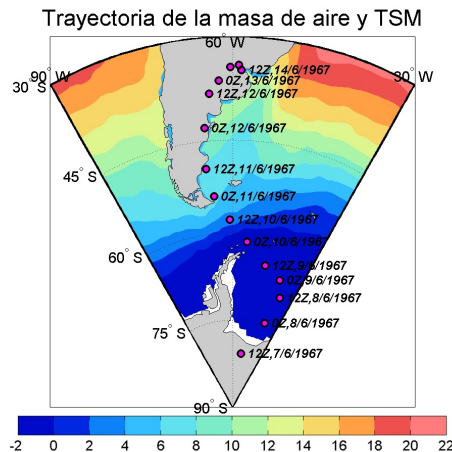


Figura 4: Trayectoria de la masa de aire entre las 12Z del día 7 de junio de 1967 y las 12Z del día 14 de junio de 1967 (cada 12 horas, círculos rosados) y temperatura de la superficie del mar (TSM) promediada durante el mes de junio de 1967 (sombreado, en °C).

3.2 Trayectoria del aire polar en su avance hacia la Argentina

La Fig. 4 muestra la trayectoria seguida por la IAF hacia el centro argentino. Dicha trayectoria fue calculada utilizando el modelo HYSPLIT. Como puede verse en la figura, la masa de aire frío emergió del continente antártico alrededor de las 12Z del 7 de junio de 1967 (exactamente una semana antes de que se registraran las TMn históricas en AMBA), avanzando en forma meridional rumbo al continente y llegando a las costas patagónicas en la mañana del día 11 de junio. Puede apreciarse el poco tiempo de permanencia de la masa de aire polar sobre el océano (sólo 4 días), y al superponer la información de reanálisis de TSM se observa que durante ese mes la isoterma de 0°C en la TSM se ubicaba alrededor de los 60°S. En su desplazamiento hacia el norte la masa de aire frío atravesó una zona de fuerte gradiente de TSM al sur de Tierra del Fuego pero nunca avanzó sobre áreas con TSM mayores a los 8°C, acotando así la potencial transformación que pudiese haber sufrido la masa de aire debido a los flujos de calor de la superficie. La masa de aire luego se centró sobre el extremo este de la provincia de

La Pampa en la mañana del día 12 de junio, y dos días después sobre el noreste de la provincia de Buenos Aires.

Trayectorias de las 5 irrupciones más frías de junio

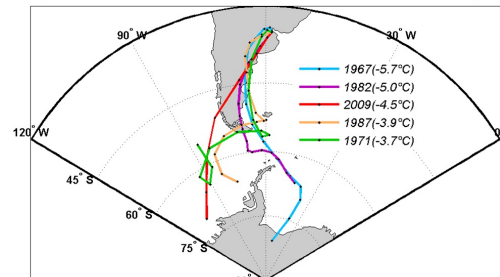


Figura 5: Trayectorias seguidas por las 5 masas de aire frío que dejaron las temperaturas mínimas absolutas en Ezeiza, según los datos de temperatura de superficie en los radiosondeos de las 12Z. Se indican los años de ocurrencia y la temperatura mínima alcanzada en cada caso.

Fecha	T sondeo Ezeiza (12Z)	T Ezeiza Aero	T Obs Ctral Bs As
14/6/1967	-5.7°C	-7.8°C	-5.3°C
16/6/1982	-5.0°C	-5.8°C	-1.4°C
24/6/2009	-4.5°C	-5.0°C	-0.5°C
14/6/1987	-3.9°C	-5.2°C	-1.5°C
17/6/1971	-3.7°C	-4.2°C	-1.5°C

Tabla II: Fechas de ocurrencia de las 5 irrupciones de aire frío más intensas en Ezeiza durante el mes de junio, según la serie de temperaturas medidas en superficie en los radiosondeos de 12Z. También se indican las correspondientes temperaturas mínimas diarias registradas esos mismos días en la estación Ezeiza Aero y Observatorio Central Buenos Aires.

Los datos aerológicos fueron utilizados para describir el perfil termodinámico asociado a la IAF así como también para identificar las cinco IAF más intensas de los meses de junio en

Ezeiza. Las fechas correspondientes a esos cinco eventos se muestran en la Tabla 2, donde se presentan ordenadas en función de los valores de temperatura de 12Z de los sondeos de junio de Ezeiza (período 1961-2010). En esa tabla también se indican las temperaturas de superficie reportadas por los datos aerológicos de Ezeiza y las TMn registradas en el abrigo meteorológico de OCBA para esos mismos días. Es interesante notar que el valor de TMn absoluto en Ezeiza correspondiente a esta situación, de $-7,8^{\circ}\text{C}$, es 2°C más bajo que el segundo valor extremo de la serie, correspondiente al mes de junio de 1982. También cabe destacar que en el tercer puesto se encuentra una IAF reciente, del año 2009. En todos los casos se aprecian temperaturas algo más altas en los datos aerológicos (los que en rigor corresponden a las 12Z, por lo que no tienen por qué coincidir con el horario de la TMn) así como también en OCBA, localidad en la que se aprecia una marcada diferencia entre el valor correspondiente a junio de 1967 y los valores siguientes de la serie, que son notoriamente más elevados. Con esta información se construyó la Fig. 5, donde se muestran las trayectorias hacia atrás correspondientes a las cinco IAF más extremas considerando a la localidad de Ezeiza y a las 12 UTC del día de ocurrencia del mínimo de temperatura como punto final de la trayectoria. En todos los casos, se considera la trayectoria durante los 7 días previos. Se observa que la segunda IAF más intensa, de junio de 1982, siguió una trayectoria similar a la de junio de 1967, incluso con un desplazamiento un tanto más continental al ingresar al continente por Tierra del Fuego y desplazarse hacia el norte, lejos de la influencia del océano. Las siguientes tres IAF en función de su intensidad, de los meses de junio de 2009, 1987 y 1971, presentaron en cambio un desplazamiento mucho más oceánico proveniente desde el Pacífico Sur. Incluso la IAF del año 2009 ingresa al continente en latitudes relativamente bajas, cercanas a 50°S , de forma similar al ingreso típico de las masas de aire frío en Argentina durante el invierno (Escobar y Bischoff, 1999).

En base a los datos aerológicos de la estación

Ezeiza también se obtuvo el perfil térmico medio de las 12Z considerando todos los sondeos del mes de junio entre 1961 y 2010, así como también el perfil registrado en la mañana del 14 de junio de 1967. Dichos resultados se presentan en la Fig. 6. Como puede apreciarse, el perfil medio de temperatura entre superficie y 700 hPa (curva verde) presenta una inversión en niveles próximos a superficie, en tanto que por encima de 1000 hPa la temperatura presenta una disminución gradual desde unos 8°C hasta 0°C en 700 hPa. En el caso del sondeo del 14 de junio de 1967 (curva roja), pueden apreciarse temperaturas por debajo de los valores medios en todos los niveles considerados, ubicándose en el nivel de superficie más de 2 desvíos estándar por debajo del valor medio del correspondiente nivel. Es interesante notar que el valor de $-5,7^{\circ}\text{C}$ corresponde al mínimo de la serie para el nivel de superficie. Para el nivel de 1000 hPa, el mínimo también pertenece a la misma situación sinóptica solo que dos días antes, tal como sucede en el nivel de 700 hPa. En 850 hPa, en cambio, el mínimo de la serie ($-8,5^{\circ}\text{C}$) pertenece a una IAF ocurrida hacia finales de junio del año 1996. Tal como se discutirá más adelante, la ocurrencia de temperaturas mínimas tan bajas durante esta IAF se debió a una intensa advección fría hacia el centro del país junto a procesos locales diabáticos que permitieron la formación de una inversión térmica intensa cerca de la superficie.

3.3 Configuración sinóptica de la irrupción fría

Las Fig. 7-11 muestran la evolución de la situación sinóptica durante la IAF entre los días 10 y 14 de junio de 1967. En diferentes paneles se muestran los campos de las 12Z de H y V en 250 hPa, H, T y vorticidad relativa en 500 hPa, H, T y V en 850 hPa, y de viento a 10 metros, espesor 500/1000 y PNMM. Como puede verse, el ingreso del aire polar se asoció a la amplificación de una vaguada de onda corta sobre el Atlántico Sur durante los días 10 y 11 de junio (Fig. 7b y 8b), acompañada a su vez por el aumento de amplitud de una cuña centrada en el Pacífico Sur frente a las costas de Chile

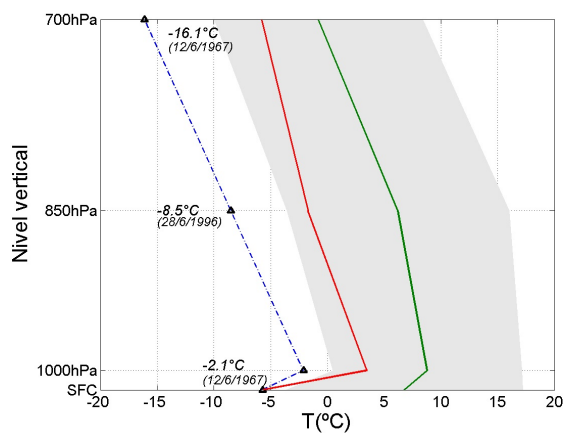


Figura 6: Perfil vertical medio de temperatura entre superficie y 700 hPa para el mes de junio en Ezeiza a las 12Z considerando el período 1961-2010 (curva verde) y perfil vertical de temperatura a las 12Z del 14 de junio de 1967 (curva roja). La franja gris se obtuvo restando y sumando 2 desvíos estándar (en función del nivel) a la temperatura media de cada nivel de la curva verde. La curva azul a trazos une los valores mínimos absolutos de temperatura en cada nivel para el período 1961-2010 junto con su fecha de ocurrencia. El valor de superficie es de -5.7°C y corresponde al día 14 de junio de 1967 indicado por la curva roja.

y extendiéndose hacia la Península Antártica (Fig. 8b). Esta configuración dio lugar a un incremento en el gradiente horizontal de T sobre el norte de la Patagonia entre los días 10 y 11 (Fig. 7c y 8c), provocando por relación de viento térmico una intensificación en el flujo zonal en niveles altos (Fig. 7a y 8a) que se maximizó durante el día 12 de junio, cuando la corriente en chorro se ubicó sobre el norte argentino con velocidades máximas superiores a los 130 nudos. En el campo de superficie se observa la inestabilización de las ondas tanto del Atlántico como del Pacífico y la intensificación del flujo del sector sur, desde la Península Antártica hacia el continente americano (Fig. 8d). Es interesante notar la evolución en el campo de superficie entre los días 10 y 11, cuando la masa de aire polar

abandonó el Mar Glaciar Antártico tomando una trayectoria SE-NO rumbo a Argentina (Fig. 7d) y alcanzó las costas patagónicas adquiriendo un desplazamiento más meridional (Fig. 8d): durante el día 10, el frente frío responsable de la IAF se hallaba sobre la provincia de Tierra del Fuego, en tanto que 24 horas después (Fig. 8d) se localizaba sobre el centro de la Patagonia, avanzando luego en dirección noreste y advectando valores muy bajos de espesor 500/1000, inferiores a los 5250 mgp. Asimismo, del análisis de la evolución del campo de 250 hPa entre los días 10 y 12 de junio surge cómo la propagación de energía corriente abajo del flujo favoreció la intensificación de los sistemas de cuña-vaguada, ayudando así a la inyección del aire frío desde latitudes altas hacia el centro y norte de la Argentina. Durante el día 12 de junio (Fig. 9), el mínimo de H en 500 hPa arribó al centro de la Argentina, a la vez que el anticiclón de niveles bajos que se encontraba anteriormente sobre el Pacífico comenzó a ingresar (apoyado por la cuña de altura ubicada corriente arriba en niveles medios) al continente alcanzando un valor de 1032 hPa sobre el norte de Neuquén y sur de Mendoza (Fig. 9d). La T en 850 hPa aún registraba los valores mínimos sobre el norte de la Patagonia, La Pampa y sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Fig. 9c). A lo largo del día 13 (Fig. 10), el anticiclón migratorio continuó avanzando hacia el centro del país, en tanto que la T en 850 hPa presentaba dos mínimos, uno sobre el centro-oeste argentino y otro sobre el Atlántico Sur, vinculado este último con la vaguada que en el campo de 500 hPa (Fig. 10b) puede observarse saliendo del continente sudamericano y ubicándose parcialmente aún sobre Uruguay y el norte argentino. Finalmente, durante el día 14 de junio (Fig. 11), cuando se alcanzaron los extremos térmicos en varias estaciones del centro-este de la Argentina, se observa al anticiclón bien instalado sobre el norte de la provincia de Buenos Aires y sur del Litoral, a la vez que la Patagonia ya presentaba una intensificación del flujo del oeste (Fig. 11d) y un gradual aumento en las T de niveles bajos (Fig. 11c). El campo de niveles medios (Fig. 11b), en tanto, muestra una configuración de H más zonal.

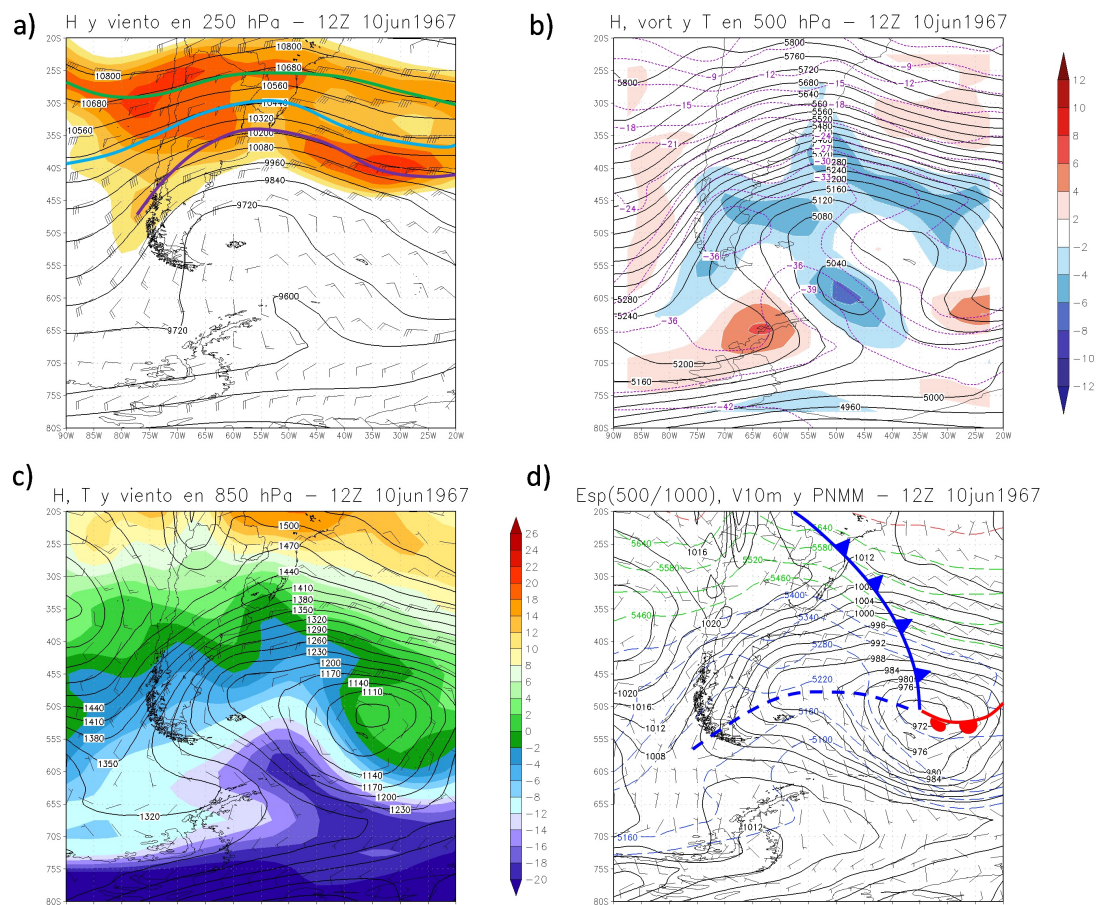


Figura 7: Situación sinóptica a las 12Z del día 10 de junio de 1967, en base a datos de reanálisis NCEP/NCAR: a) Altura geopotencial (contornos, en unidades de mgp), viento (barbas, en nudos) e isotacas (sombreado, en nudos) en el nivel de 250 hPa; b) altura geopotencial (contornos negros, en mgp), temperatura (contornos violetas a trazos, en $^{\circ}\text{C}$) y vorticidad relativa (sombreado, $\times 10^5 \text{ s}^{-1}$) en 500 hPa; c) altura geopotencial (contornos, en mgp), viento (barbas, en m s^{-1}) y temperatura (sombreado, en $^{\circ}\text{C}$) en 850 hPa; y d) presión al nivel medio del mar (contornos, en hPa), viento a 10 mts (barbas, en m s^{-1}) y espesor 500/1000 (contornos de colores, en mgp). En a) se indican también las posiciones de la corriente en chorro subtropical (en verde) y de las ramas norte y sur de la corriente en chorro polar (en celeste y violeta, respectivamente). En d) se muestra, de corresponder, la ubicación de los frentes fríos, cálidos, semiestacionarios y ocluidos analizados en base a los campos de espesores y de presión al nivel medio del mar.

La corriente en chorro de altura (Fig. 11a) se encontraba sobre el norte del país, debilitándose gradualmente respecto a los días previos.

La Fig. 12 muestra cuán anómala fue la IAF a través de los campos de anomalía de PNMM y de espesor 500/1000 de las 12Z del 11 de junio de 1967, respecto a sus respectivos campos medios del mes de junio en el período 1961-2010. En el caso de la PNMM se aprecian anomalías del

orden de unos 30 hPa al este de la provincia de Buenos Aires, poniendo en evidencia la intensidad del ciclón de superficie que favoreció el ingreso de aire polar, a la vez que las anomalías de espesor 500/1000 alcanzan magnitudes mayores a unos -240 mgp, representando así la rigurosidad de la masa de aire frío.

La presencia del anticiclón de niveles bajos sobre el centro argentino junto con la naturaleza de la

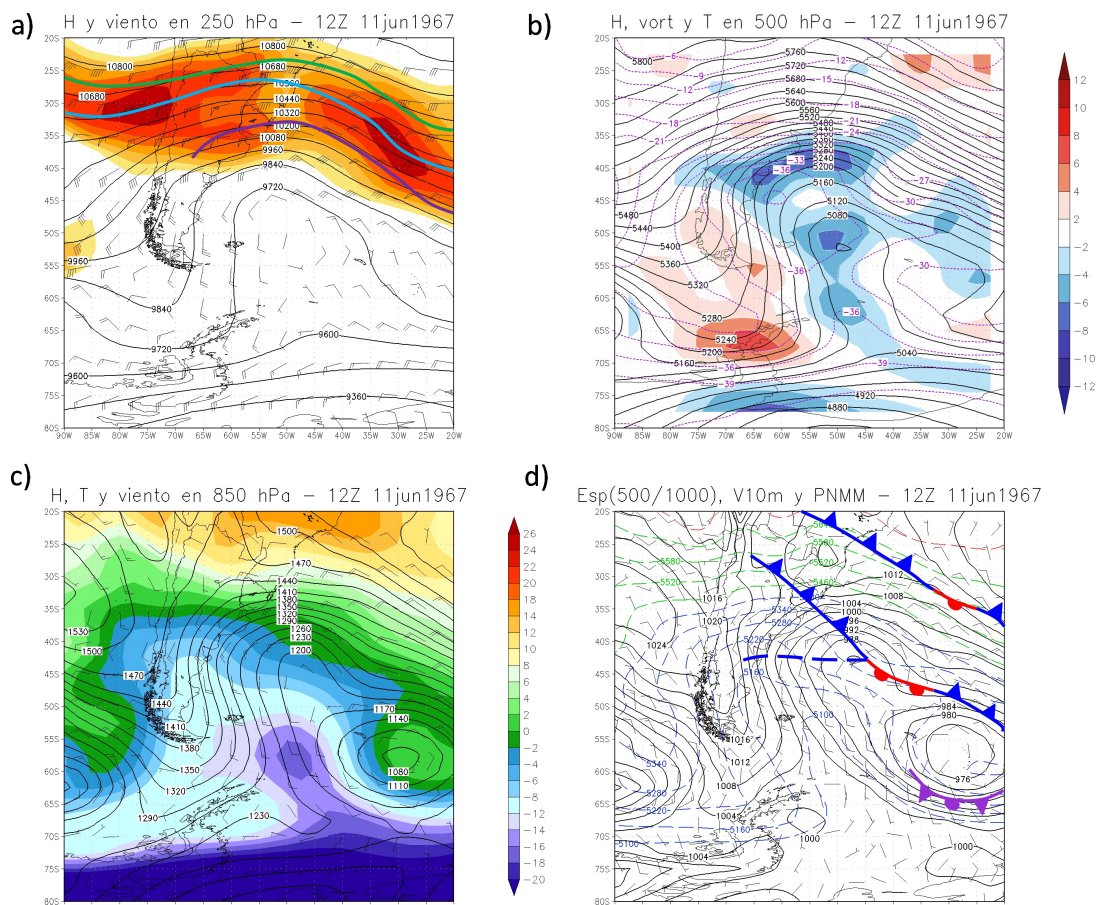


Figura 8: Como en la Fig. 7, pero para las 12Z del día 11 de junio de 1967.

masa de aire frío presente en la zona favorecieron un fuerte enfriamiento radiativo durante las horas nocturnas que facilitó la formación de la capa estable de inversión cerca de superficie (Fig. 6), ayudando de esta manera a la ocurrencia de tan bajas temperaturas. En la siguiente sección se recurre al modelado numérico para comprender mejor los procesos termodinámicos que afectaron a la masa de aire a lo largo de su desplazamiento desde latitudes altas hacia el centro de la Argentina.

4. SIMULACIÓN DE LA IRRUPCIÓN FRÍA CON EL MODELO NUMÉRICO WRF

La Fig. 13 muestra las evoluciones de los campos de T2m y PNMM simulados por el modelo regional WRF entre las 12Z del día 11 y las 12Z del día 14 de junio de 1967. En la mañana del día

11 se aprecia cómo las temperaturas más bajas sobre el continente se ubicaban sobre la meseta patagónica, mientras que el campo de presión evidencia la posición de un frente frío sobre el norte de la provincia de Buenos Aires y sur de Uruguay, y un segundo frente frío asociado al aire polar sobre el centro-norte de la Patagonia. Entre los días 12 y 13 de junio (Fig. 13b,c) es notable el avance hacia el norte tanto del frente frío como de las temperaturas más bajas, alcanzando durante el día 13 de junio el centro de la provincia de Buenos Aires y dejando allí valores de T2m variando entre -2 y -4°C. El día 14 de junio (Fig. 13d) presenta valores de T2m similares a los del día 13, junto con una amplia zona de vientos débiles o de calmas afectando al norte de la provincia de Buenos Aires y gran parte del Litoral argentino evidenciada a partir del muy débil gradiente de PNMM.

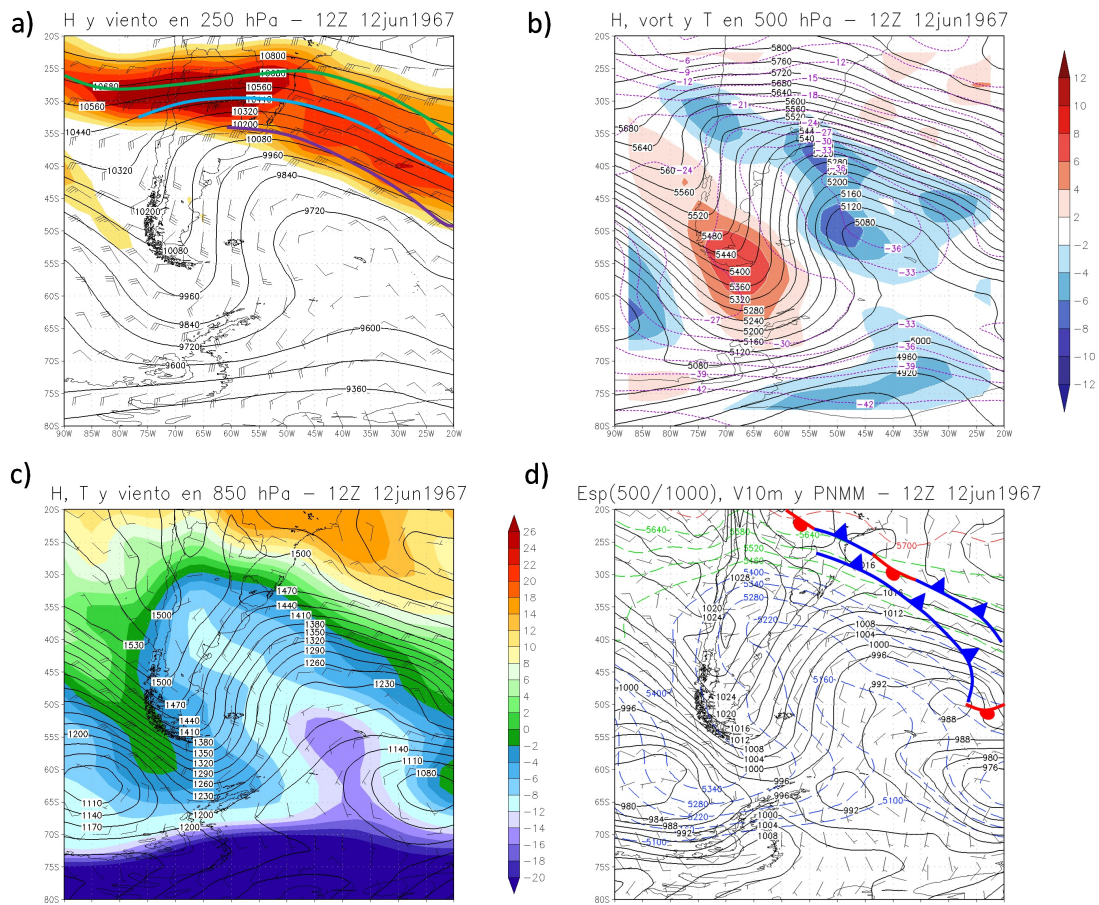


Figura 9: Como en la Fig. 7, pero para las 12Z del día 12 de junio de 1967.

La trayectoria simulada de la masa de aire que arribó al centro de la provincia de Buenos Aires el día 14 de junio de 1967 se muestra en la Fig. 14. De modo similar a la trayectoria dada por el modelo HYSPLIT en base a los reanálisis (Fig. 4), el modelo regional es capaz de simular el desplazamiento del aire frío desde el Atlántico Sur hacia el noroeste, ingresando al país sobre el este de la región patagónica y luego moviéndose rumbo al norte y noreste. Durante los días 10 y 11, la trayectoria simulada muestra el desplazamiento de la masa de aire sobre superficie oceánica de forma similar a los resultados del modelo HYSPLIT, y tal como se discutió anteriormente esto podría haber llevado a una modificación de sus propiedades termodinámicas. Para analizar este aspecto, en la Fig. 15 se muestran las series temporales de temperatura potencial, altura, calor diabático y flujos de superficie siguiendo

a la masa de aire desde el comienzo de la simulación hasta su arribo en el centro de la provincia de Buenos Aires. Es interesante notar el fuerte aumento de temperatura potencial con el avance de la IAF sobre el océano más caliente (donde se observaban valores de TSM variando entre 4 y 8°C), lo cual llevó a un incremento de temperatura de 8 grados en 36 horas, alcanzando los 276K al momento de alcanzar la costa patagónica (Fig. 15a). Este calentamiento se explica en parte por los intensos flujos de calor desde superficie (Fig. 15d) que luego fueron redistribuidos verticalmente por la turbulencia que surge como consecuencia de este calentamiento en la capa límite y por la convección húmeda que estaba teniendo lugar y que también es en gran medida consecuencia del calentamiento desde superficie. A partir del día 11 de junio, cuando la masa de aire alcanza la costa patagónica, se observa cómo

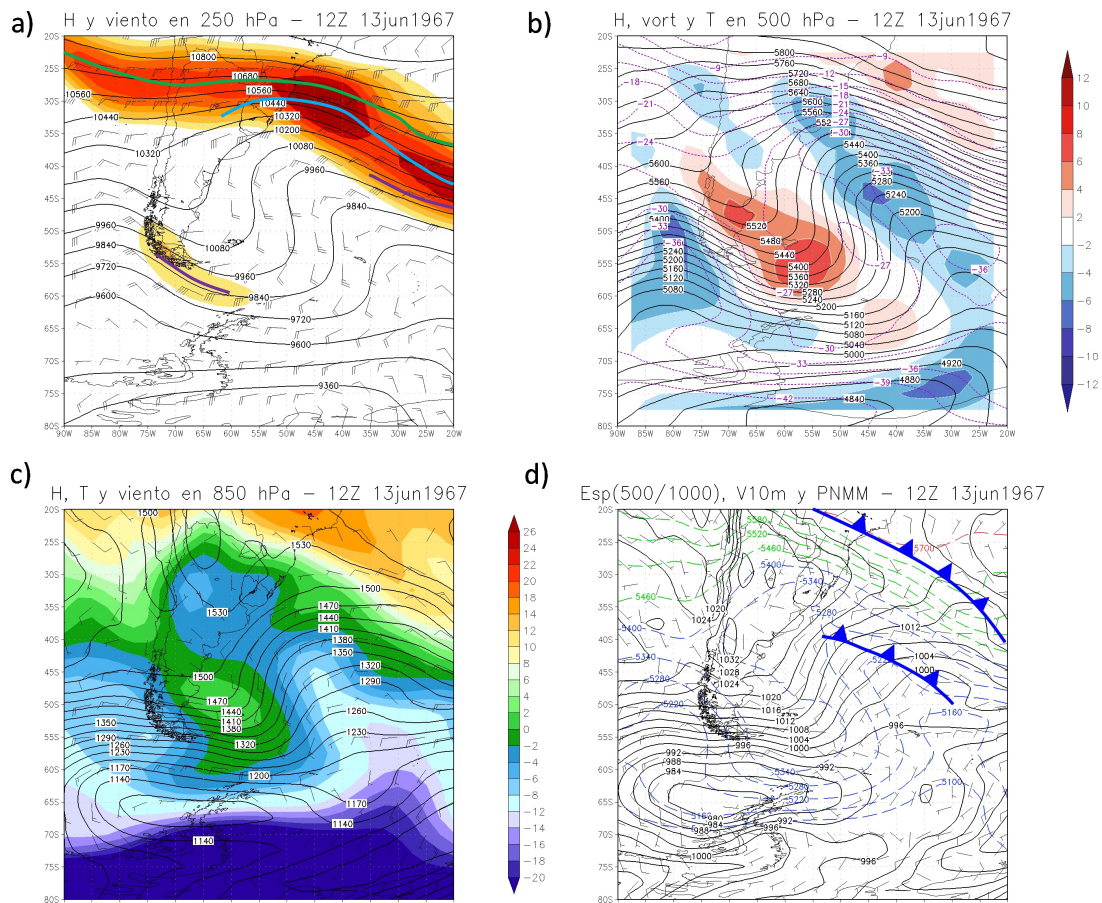


Figura 10: Como en la Fig. 7, pero para las 12Z del día 13 de junio de 1967.

entra en juego el ciclo diurno en la modificación de la temperatura potencial de la masa de aire, generando un calentamiento diabático en horas diurnas y enfriamientos diabáticos durante las noches (Fig. 15a,c). Es importante mencionar que hacia el final de la trayectoria y cerca de superficie, los procesos diabáticos juegan un papel importante en determinar la magnitud de las temperaturas mínimas observadas.

Con el fin de comprender mejor el aporte relativo de los diferentes procesos a la ocurrencia de las TMn extremas sobre el centro de la Provincia de Buenos Aires, la Fig. 16 muestra las evoluciones temporales entre los días 10 y 14 de junio de 1967 de algunos de los términos de la ecuación termodinámica, incluyendo la variación local y total de la temperatura potencial (Fig. 16a y 16b, respectivamente), la advección horizontal de temperatura potencial (Fig. 16c) y el término

asociado a los movimientos verticales (Fig. 16d) dentro de la capa límite. Es interesante notar cómo entre los días 10 y 12 de junio la advección fría es evidente sobre el centro de la provincia de Buenos Aires, maximizándose sobre todo alrededor de las 48-60 horas de simulación (entre las 00Z y las 12Z del día 12 de junio; Fig. 16c). Entre los días 12 y 13 de junio, el avance del anticiclón postfrontal da lugar a una clara disminución en la intensidad del viento horizontal (Fig. 16c) así como también a una intensificación de los movimientos verticales descendentes que contribuyen a un calentamiento por compresión adiabática en la parte superior de la capa de mezcla (Fig. 16d). Es interesante notar que los descensos son más intensos durante las horas de la noche que es cuando el enfriamiento advectivo es reforzado por el enfriamiento radiativo en niveles bajos. Este comportamiento podría explicarse en base a la

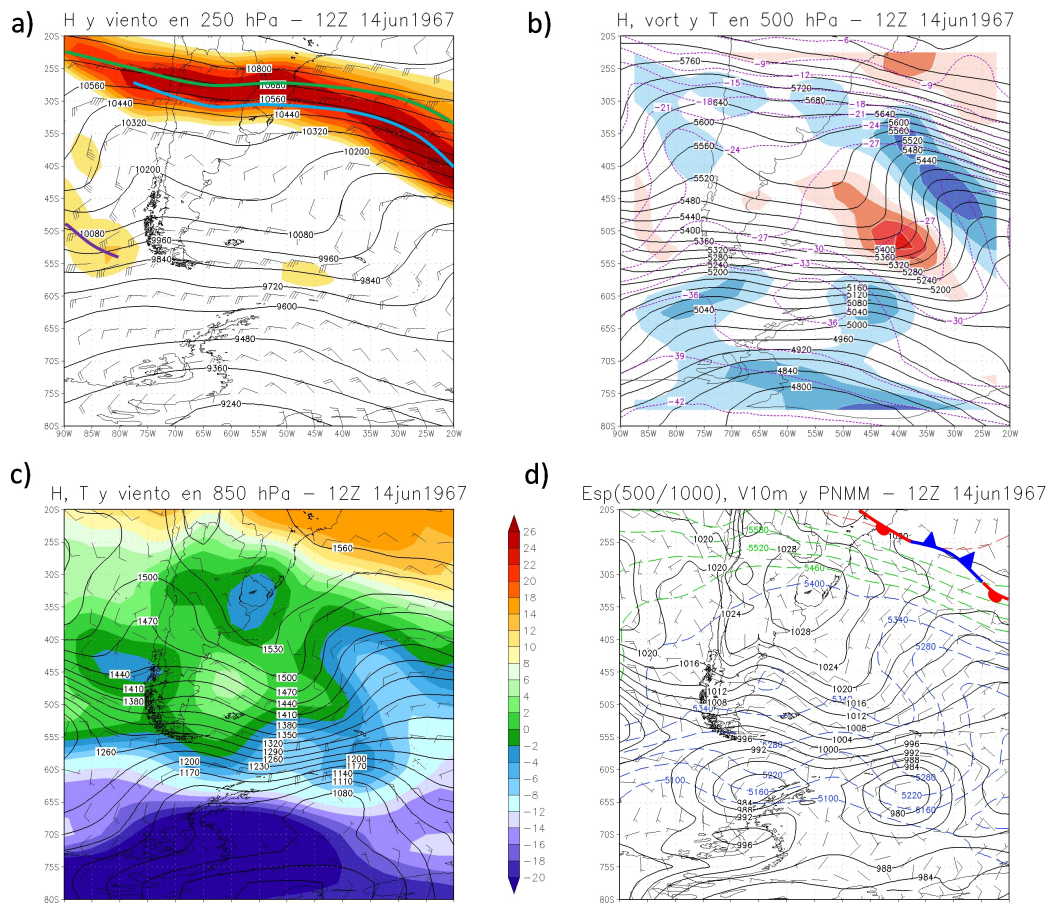


Figura 11: Como en la Fig. 7, pero para las 12Z del día 14 de junio de 1967.

teoría cuasigeostrofica, dado que un sumidero de calor diabático cercano a superficie durante la noche estaría asociado a un incremento de los movimientos descendentes por encima de los niveles en donde actúa dicho sumidero; por el contrario, durante el día la fuente de calor diabático asociada al calentamiento radiativo y a su redistribución por la turbulencia dentro de la capa límite contribuirían al debilitamiento de los movimientos de descenso.

Los procesos antes mencionados determinaron que entre los días 13 y 14 de junio se alcanzaran los valores extremos fríos ya discutidos, a la vez que a partir del día 14 el alejamiento del anticiclón hacia el este propició una intensificación del viento y que las temperaturas se comenzasen a recuperar en forma gradual. La evolución de la variación local de temperatura potencial (Fig. 16a) muestra la evolución del

ciclo diurno radiativo y de cambios en la estratificación térmica de la atmósfera en niveles bajos, con aumentos (disminuciones) de la estabilidad en horas nocturnas (diurnas), en tanto que a través de la evolución de la variación total de temperatura potencial (Fig. 16b) se observa que el calentamiento diabático es máximo durante el día en niveles cercanos a la superficie pero se redistribuye en la vertical alcanzando alturas cercanas a los 1500 metros sobre el nivel del mar. Esto puede explicarse mediante la Fig. 17, donde se muestran las evoluciones de los cortes verticales de los términos de divergencia de flujo de calor turbulento (Fig. 17a) y radiativo (Fig. 17b). De dicha figura resulta claro que el termino diabático más importante es aquel relacionado con los flujos de calor desde la superficie y su redistribución vertical asociada a la turbulencia. No obstante, existe también un aporte al

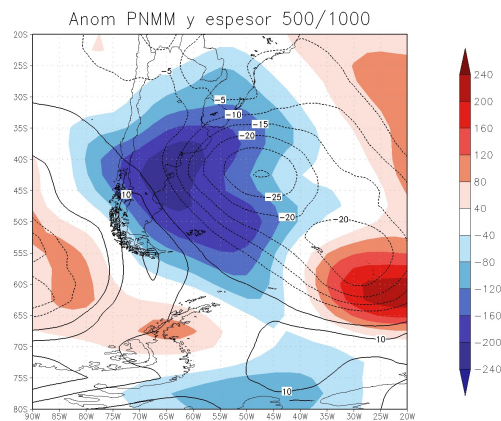


Figura 12: Anomalías de espesor 500/1000 (sombreado, en unidades de mdp) y de presión al nivel medio del mar (contornos, en unidades de hPa) a las 12Z del 11 de junio de 1967 respecto a los valores medios del mes de junio correspondientes al período 1961-2010.

enfriamiento nocturno vinculado al efecto de la divergencia de flujos radiativos en la atmósfera. Este efecto es más significativo cerca del nivel donde se produce la inversión térmica asociada al enfriamiento desde superficie ya que en ese punto se produce un máximo local del perfil de temperatura que favorece la divergencia de los flujos radiativos verticales en onda larga. Durante los tres primeros días de simulación (entre las horas 12 y 72) se aprecia que la divergencia de flujos turbulentos alcanza alturas mayores, en tanto que a partir del día 13 de junio, con la intensificación de los movimientos de subsidencia, dichos flujos quedan acotados a alturas menores.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se revisitó la situación sinóptica asociada al ingreso de aire frío que dio lugar a temperaturas mínimas extremadamente bajas en amplias zonas de la Argentina entre los días 11 y 14 de junio de 1967. En términos estadísticos, se documentó que dicha IAF provocó temperaturas mínimas extremas en especial en estaciones del centro de la Argentina y asimismo se mostró que dichos valores extremos representan los valores

más bajos de temperatura mínima para el mes de junio durante el período 1961-2010, siendo incluso los valores más fríos de temperatura mínima del mes de junio en toda la historia de algunas estaciones (tal como en Observatorio Central Buenos Aires).

El análisis del perfil termodinámico de la IAF se centró en la estación Ezeiza dado que es la estación aerológica más cercana a donde se registraron los valores extremos más anómalos. Durante la ocurrencia de las temperaturas mínimas extremas, dicha localidad mostró un perfil típico de ingreso de aire frío y estabilidad, con una profunda inversión térmica en niveles bajos de la troposfera y temperaturas por debajo de lo normal llegando incluso hasta el nivel de 700 hPa. Es interesante notar que tanto el nivel de superficie como los niveles de 1000 y 700 hPa alcanzaron sus valores mínimos históricos de toda la serie (1961-2010) con esta irrupción fría. En todos los niveles, a su vez, dichos valores se encuentran más de 2 desvíos estándar por debajo de los valores medios para los respectivos niveles.

En términos de circulación, se encontró que la IAF de junio de 1967 se asoció al avance de una profunda vaguada en niveles medios y bajos de la atmósfera, la cual fue responsable de transportar aire muy frío subpolar desde el Atlántico Sur hacia el centro de Argentina. Esta irrupción polar se vinculó a una importante anticiclogénesis sobre el norte patagónico, donde se desarrolló un sistema anticiclónico de PNMM cercana a los 1035 hPa y que ayudó durante los días 13 y 14 de junio a dejar una amplia zona de vientos débiles o calmas, favoreciendo el enfriamiento radiativo y el descenso de temperaturas. Los campos de 250 hPa mostraron además cómo la propagación de energía baroclínica y la correspondiente amplificación de los sistemas de presión favoreció el ingreso del aire frío de latitudes altas hacia latitudes bajas del centro y norte de la Argentina. Este comportamiento ya fue reportado previamente por Garreaud (2000) en su caracterización de IAF sobre el sur de Sudamérica.

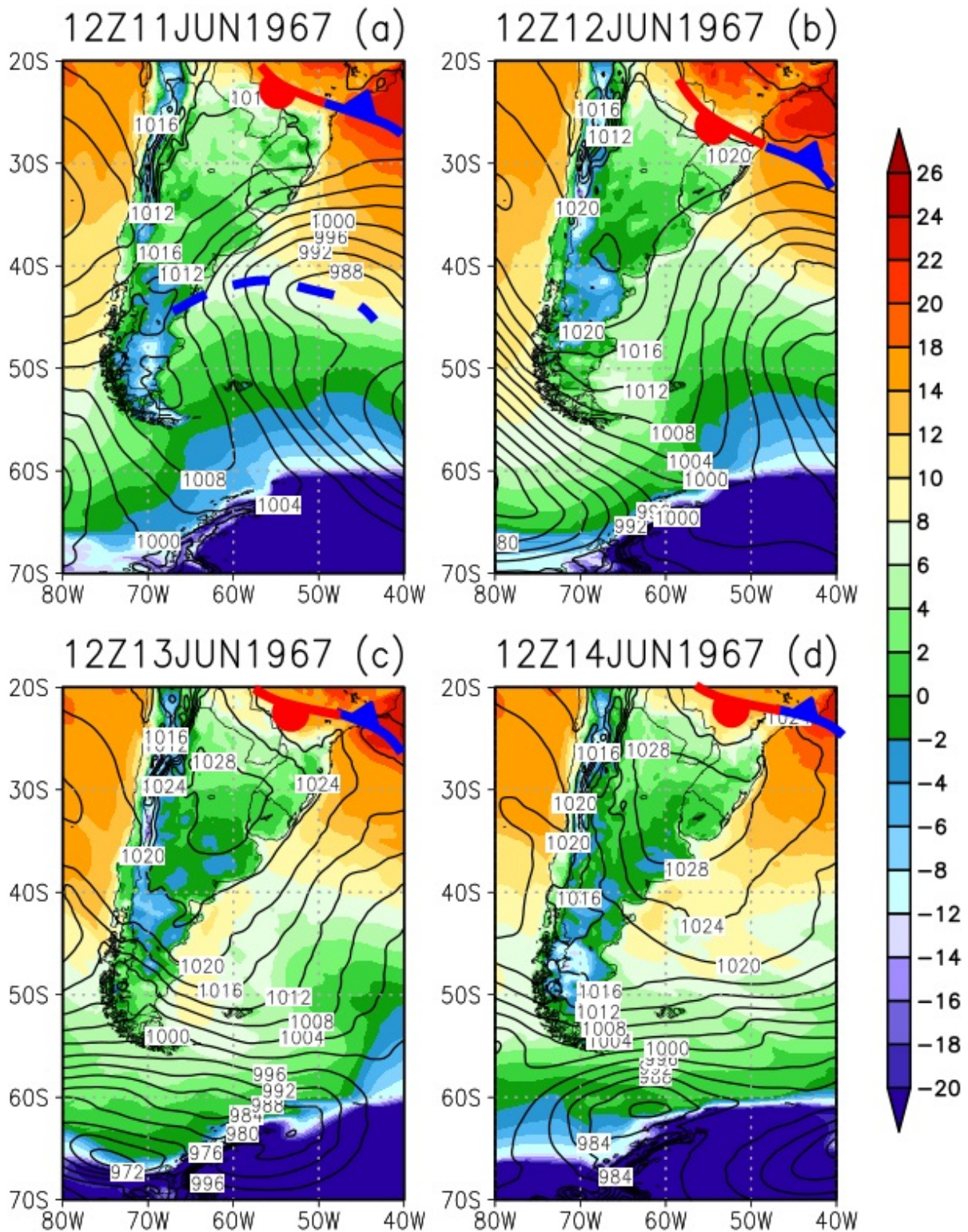


Figura 13: Campos de temperatura a 2 mts (sombreado, en °C) y presión al nivel medio del mar (contornos, en hPa) simulados por el modelo regional WRF inicializado a las 00Z del día 10 de junio de 1967, válido para las (a) 12Z del 11 de junio de 1967, (b) 12Z del 12 de junio de 1967, (c) 12Z del 13 de junio de 1967 y (d) 12Z del 14 de junio de 1967. Se muestra también, de corresponder, la ubicación de los frentes fríos, cálidos, semiestacionarios y ocluidos analizados en base a los campos de espesores y de presión al nivel medio del mar simulados por el modelo regional.

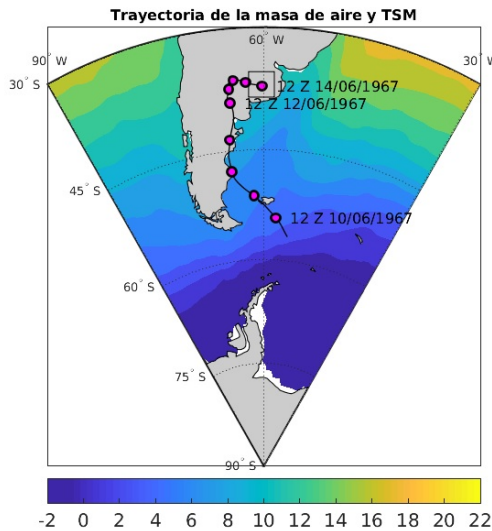


Figura 14: Trayectoria de la masa de aire entre las 00Z del día 10 de junio de 1967 y las 12Z del día 14 de junio de 1967 (cada 12 horas, círculos rosados) derivada a partir de la simulación realizada con el modelo WRF y temperatura de la superficie del mar (TSM) promediada durante el mes de junio de 1967 (sombreado, en °C). El período de simulación abarcó desde las 00Z del día 10 de junio hasta las 00Z del día 17 de junio de 1967.

En este trabajo también se calculó la trayectoria de dicha masa de aire así como también la de las cinco IAF más intensas de los últimos 50 años. En particular, la irrupción de 1967 se originó en el continente antártico y avanzó sobre el Mar Glacial Antártico y el Océano Atlántico Sur, donde fue sometida a una fuerte modificación de sus propiedades termodinámicas a través de los intensos flujos de calor de la superficie del océano. Esto se caracterizó a través de la simulación numérica de esta situación mediante el modelo regional WRF. Dicha simulación fue capaz de mostrar correctamente el desplazamiento de la masa de aire polar desde el Atlántico Sur rumbo al centro argentino y permitió cuantificar los diferentes mecanismos dinámicos y termodinámicos responsables de la IAF. Durante el tiempo de permanencia de la masa de aire sobre regiones oceánicas, la misma fue sometida a una fuerte modificación en niveles bajos a través de

los intensos flujos de superficie. Mediante una intensa advección fría en capas bajas, esta masa de aire ingresó al país por la costa patagónica y fue transportada rumbo al centro de la Argentina. A partir del día 13 de junio, la advección térmica cesó sobre el centro argentino y el establecimiento de altas presiones favoreció una intensificación de los movimientos descendentes sobre la región, ayudando así a la estratificación del aire frío en niveles cercanos a la superficie, la escasa nubosidad y la correspondiente intensa pérdida de radiación en las noches y, así, las muy bajas temperaturas registradas en las mañanas de los días 13 y 14 de junio de 1967.

Indudablemente, la trayectoria de la masa de aire desde la costa antártica hacia la costa patagónica argentina y su tiempo de residencia relativamente corto sobre la superficie oceánica contribuyeron a que se registraran las temperaturas mínimas tan extremas. Aún así, sería interesante avanzar en identificar aspectos adicionales que puedan contribuir a entender por qué ingresos de aire frío que presentan configuraciones sinópticas similares dan lugar a temperaturas extremas en algunos casos y no en otros. Esto podría estar vinculado por ejemplo con el contenido de humedad del suelo previo a la irrupción fría, a la presencia o ausencia de cobertura de nieve sobre la región patagónica y a la extensión del borde de hielo marino alrededor de la Antártida, entre otros. Trabajos futuros podrían avanzar en esta línea, ya sea a través del análisis estadístico de situaciones observadas o mediante el modelado numérico, de modo de identificar los mecanismos implicados en situaciones sinópticas que provocan cada año un importante impacto social y económico sobre el sur de Sudamérica.

Agradecimientos: Los autores agradecen a Franco Piscitelli por sus aportes y comentarios durante el desarrollo de este trabajo y a los dos revisores anónimos por las sugerencias y recomendaciones que ayudaron a mejorar la claridad de la publicación.

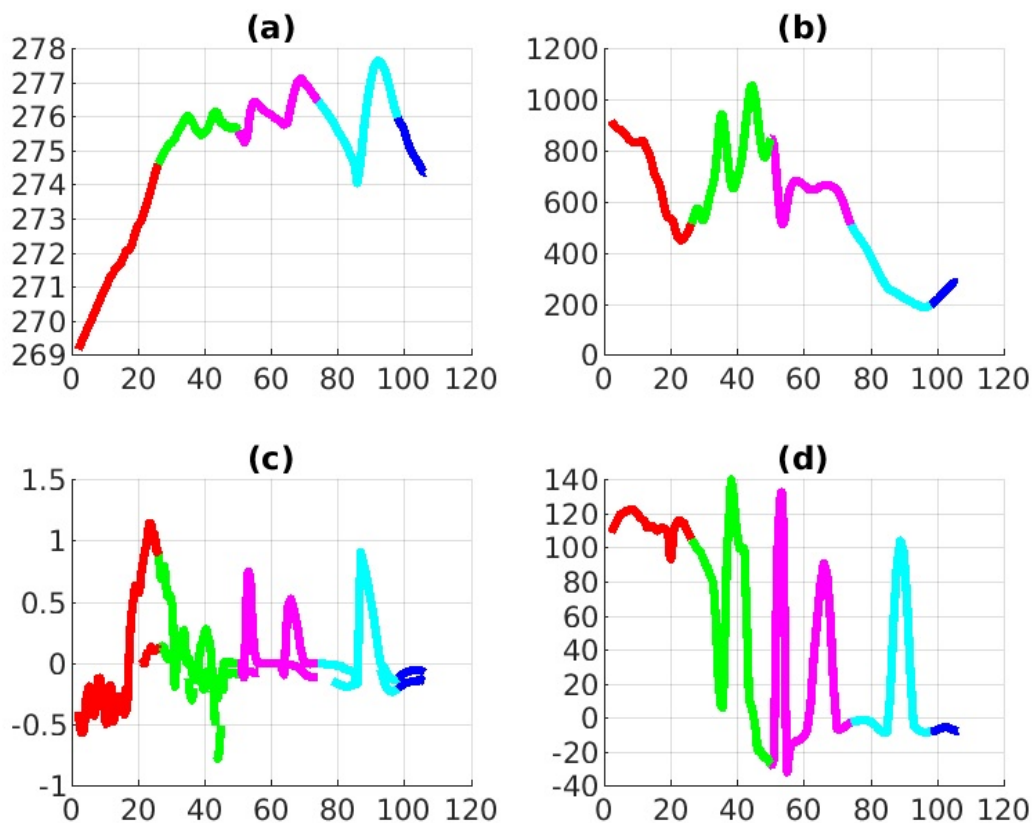


Figura 15: Series temporales entre las 00Z del 10 de junio y las 12Z del 14 de junio siguiendo la trayectoria que se muestra en la Figura 13 de: (a) temperatura potencial (K), (b) altura (m), (c) calor diabático asociado a los flujos turbulentos en la capa límite y a la convección húmeda profunda (línea continua, $K h^{-1}$) y a la radiación (línea discontinua, $K h^{-1}$), (d) flujo de calor en superficie ($W m^{-2}$), durante el día 10 de junio (línea roja), 11 de junio (línea verde), 12 de junio (línea magenta), 13 de junio (línea celeste) y 14 de junio (línea azul).

REFERENCIAS

- Degelia S., Christian J., Basara J., Mitchell T., Gardner D., Jackson S., Ragland J., y Mahan H., 2016: An overview of ice storms and their impact in the United States. *Int. J. Climatol.*, 36, 2811-2822.
- Durre I., Xungang Y., Vose R., Applequist S., y Arnfield J., 2016: Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA), Version 2. NOAA National Centers for Environmental Information, doi: 10.7289/V5X63X0Q.
- Escobar G., y Bischoff S., 1999: Meteorological situations associated with significant temperature falls in Buenos Aires: an application to the daily consumption of residential natural gas. *Meteor. Appl.*, 6, 253-260.
- Garreaud R., 1999: Cold air intrusions over subtropical and tropical South America: a numerical case study. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2823-2853.
- Garreaud R., 2000: Cold air intrusions over subtropical and tropical South America: mean structure and dynamics. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 2544-2559.
- Glisan, J.M., Gutowski W. J., Cassano J. J., y Higgins M. E., 2013: Effects of Spectral Nudging in WRF on Arctic Temperature and Precipitation Simulations. *J. Climate*, 26, 3985-3999,

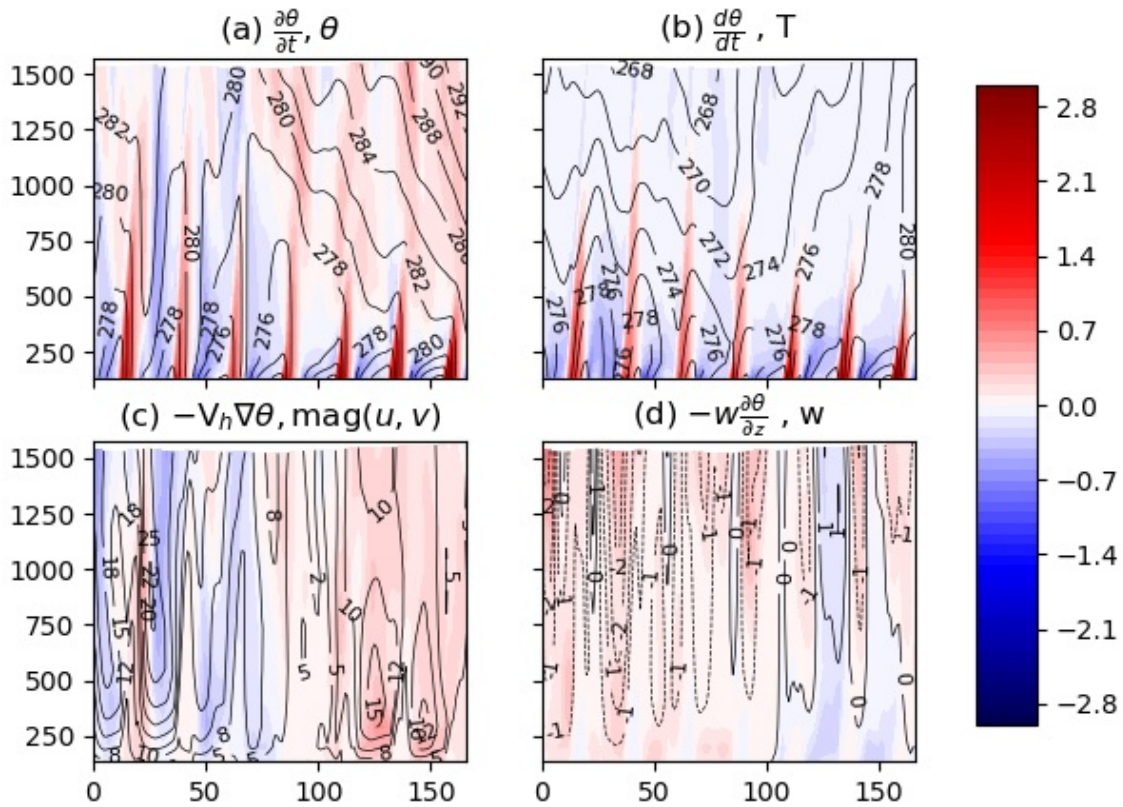


Figura 16: Perfiles verticales correspondientes a diferentes términos de la ecuación termodinámica como función del tiempo (horas desde el inicio de la simulación): (a) derivada local de la temperatura potencial (sombreado, K hr⁻¹) y temperatura potencial (K, contornos), (b) derivada total de la temperatura potencial (sombreado, K hr⁻¹) y temperatura (K, contornos), (c) advección horizontal de temperatura potencial (sombreado, K hr⁻¹) y magnitud del viento (m s⁻¹, contornos), (d) advección vertical de temperatura potencial (sombreado, K hr⁻¹) y velocidad vertical (cm s⁻¹, contornos). Todas las variables se encuentran promediadas sobre la región indicada en el rectángulo de la Figura 14.

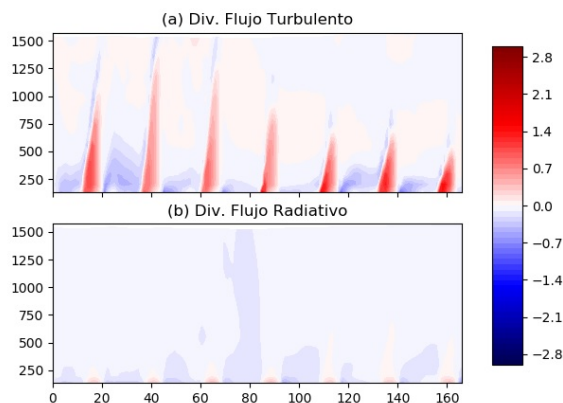


Figura 17: Perfil vertical como función del tiempo de la divergencia de flujo turbulento vertical de calor (sombreado, K hr⁻¹) (a) y de la divergencia del flujo radiativo vertical de calor (b) (sombreado, K hr⁻¹). Todas las variables se encuentran promediadas sobre la región indicada en el rectángulo de la Figura 14.

<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00318.1>

- Hong, S.-Y., y Pan H.-L., 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322–2339.
- Kain, J. S., 2004: The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170–181.
- Kalnay E., y coautores, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–471.
- Lichtenstein E., 1989: Some influences of the Andes cordillera on the synoptic-scale circulation. 3rd International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Buenos Aires. *Amer. Meteor. Soc.*, 190–191.
- Mlawer, E. J., Taubman S. J., Brown P. D., Iacono M. J., y Clough S. A., 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long wave. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), 16 663–16 682
- Müller G., y Berri G., 2007: Atmospheric circulation associated with persistent generalized frosts in central-southern South America. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 1268–1289.
- Rayner N., Parker D., Horton E., Folland C., Alexander L., Rowell D., Kent E., y Kaplan A., 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res D: Atmospheres*, 108, doi: 10.1029/2002JD002670.
- Roussel M., Pontier D., Cohen J., Lina B., y Fouchet D., 2016: Quantifying the role of weather on seasonal influenza. *BMC Public Health*, 16, 441.
- Rusticucci M., y Vargas W., 1995: Synoptic situations related to spells of extreme temperatures over Argentina. *Meteor. Appl.*, 2, 291–300.
- Salio P., Campetella C., Ruiz J., García Skabar Y., y Nicolini M., 2006: Nevadas en el sudeste bonaerense: climatología sinóptica y un caso de estudio. *Meteorologica*, 31, 67–83.
- Saucedo M., Bertolotti M., y Saurral R., 2009: Circulación predominante sobre el sur de Sudamérica durante el invierno del año 2007. *Actas del CLIMET XIII/CONGREGMET X*, Buenos Aires.
- Scian B. V., 1970: Situación sinóptica asociada a las temperaturas extremas observadas en junio de 1967. *Meteorologica*, 1, 22–37.
- Skamarock, W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Wang W., y Powers J. G., 2005: A description of the Advanced Research WRF version 2. NCAR Tech Note NCAR TN-4681STR, 100 pp.
- Stein A., Draxler R., Rolph G., Stunder B., Cohen M., y Ngan F., 2015: NOAA’s HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059–2077.
- Vera C., y Vigliarolo P., 2000: A diagnostic study of cold-air outbreaks over South America. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3–24.
- Waldron, K. M., Peagle J., y Horel J. D., 1996: Sensitivity of a spectrally filtered and nudged limited-area model to outer model options. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 529–547.
- Walsh J., Phillips A., Portis D., y Chapman W., 2001: Extreme cold outbreaks in the United

States and Europe. J. Climate, 14, 2642-2658.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la

licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.